論 文

スラスト構造の解釈と評価

—特に岩石物性と応力分布, 運動像からの予測
(新潟堆積盆地での解析例を基礎として)—*

今 村 哲 己**

(Received October 22, 1999; accepted January 25, 2000)

Interpretation and assessment of thrust structures
—Prediction using information from mechanical properties of rocks,
stress distributions and kinematic picture
(Based on the interpretation of the Niigata basin, Japan)—

Tetsumi Imamura

Abstract: Deformation of thrust structure is generally reconstructed by using the geometrical balanced cross section method. Ramp angle, its length, volume of hangingwall displacement on the detachment and thickness of sediments deformed on the ramp control the analyzed fold structures. These geological elements are directly influenced by a state of subsurface stress and rock properties. However it is difficult to include the influence of rock properties in the section which is constructed in geometrical balancing.

In this paper, two geological sections in the Niigata basin are reconstructed by the Virtual Basement Displacement (VBD) method (Kodama *et al.*, 1985), which simulates deformation and fracturing of the strata in a sedimentary basin. The distribution and magnitude of the strain concentration and fractures in these sections were analyzed quantitatively. The result of the simulation suggests that the strain is concentrated around volcanic bodies and reactivation of basement fractures in the well MITI Niigata-heiwa section A-A', and some anticlinal anomalies had existed in deeper part of synclinal area in the section B-B' during the structural deformation history. The folds are formed with vertical displacement and the shortening volume of the folds seems to be less than the result of the balanced cross section of the geometrical method.

We can comprehend some tips, images and ways of thinking during the numerical analyses considering dynamic picture and kinematic picture. The understanding of rock properties and subsurface stress will lead us to effective exploration, especially to assess the thrust structures.

Key words: thrust, rock properties, stress, simulation model, MITI Niigata-heiwa, erosion, synsedimentary tectonics, dynamic picture, kinematic picture

1. はじめに

*平成11年5月26日, 平成11年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「油田構造形成とテクトニクス」にて講演 This paper was presented at the 1999 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Oil field structure and tectonics" held in Makuhari, Chiba, Japan, May 26, 1999.

**石油公団 Japan National Oil Corporation

構造が複雑でトラップの摘出が困難なスラスト構造での解釈と評価は, 今後残された探鉱ターゲットとして, 我々が克服して行かねばならない共通の課題である。

シンポジウム講演においては, スラスト構造の基礎的な解釈上の特徴についてまとめ, 幾何学的解釈手法において解釈される構造形態を決定するためには, デタッチ

メントの深さやランプアングル、運動量の推定が重要であることを述べ、それらの推定に関連する地質現象として、主に岩石物性と応力分布の観点からのデータや解析例を紹介した。また、変形構造を左右する岩石物性や運動像に関する地質現象を盛り込んだ構造解析の事例として、新潟地域にて実施した仮想基盤変位法による解析結果を紹介することで、油田構造形成とテクトニクスに関する話題提供とした。

スラスト帯での探鉱においては、スラスト構造の形態(最終的な歪み像)の正しい把握と並行し、構造形成に至る力学像と運動像に関して地質現象との対応を探ることで、震探で不明瞭な部分の解釈を導き出し、深部トラップを発見できる可能性があると考え(今村, 1998)。

本稿は、これらの内容の一部についてまとめたものである。

2. スラスト構造解釈上の留意点

2.1 スラスト構造の基礎形態(幾何学的解釈に基づく特徴)

スラストに伴う上盤側褶曲構造形態の代表例として、fault-bend fold (断層折れ曲がり褶曲)と fault-propagation fold (断層伝播褶曲)の2種類があげられる(図1)。

断層折れ曲がり褶曲は下位の層面すべりからランプを経て階段状に切れ上がっていくスラストにより、上盤側が断層下盤側の表面形態に規制されて変形する褶曲である。一方、断層伝播褶曲は、バックリム側の褶曲形態は断層折れ曲がり褶曲に似ているが、ランプの先端部(fault tip)にて断層の変位は止まっており、それが上盤側の移動に伴い伝播するにつれ、ランプの前方にキンク褶曲状のヒンジ部をもつ褶曲を成長させていくものを言う。

これらの褶曲構造の形態は、ランプの角度、長さ(デ

図1 断層折れ曲がり褶曲(左図)と断層伝播褶曲(右図)での上盤移動量と形態変化(after Woodward et al. 1989)

タッチメントの深度差)、スラストに伴う上盤側の移動量、さらにデタッチメントから上位で変形に参加する上盤の厚さに関係して決定される。

たとえば、断層折れ曲がり褶曲の場合は、褶曲の高さはデタッチメント位置の深度差(footwall flatと hangingwall flatの深度差)を越えることはなく、また、最も移動量の多い場合には、バックリムがフットウォールランプの長さや角度に等しくなる。一方、断層伝播褶曲では上盤側の移動量に伴い背斜状構造は成長し続ける特徴を持つ。また、図2左のように上盤側の移動量が一定でもランプの角度変化によって形成される背斜構造の形態は著しく異なり、さらに移動量が増加するとスラストがいろいろな位置で切り離れることが考えられている(図2右)。

これらの幾何学的特徴をもとにして、震探解釈などからスラスト構造を解釈する場合には、上盤側の背斜構造形態(フォアリム、バックリム)における角度の変化やその長さ、背斜構造の高さを把握し、デタッチメント位置や運動量を仮定することで、全体の構造形態を推定していく。

2.2 スラスト構造の解釈上の問題点

一般に、スラスト構造のバックリム側の震探記録は、急傾斜や断層を伴うことの多いフォアリム側の記録よりも良好であることが多く、バックリム側での地層傾斜の

図2 ランプの角度変化による構造形態の変化(左図)、断層伝播にともなういろいろなブレイクスルーによる形態変化(右図)(after Tearpock, et al. 1991)

微妙な変化は、深部でのランプの構成や形態を直接的に反映してしていることになるので、注意深く解釈することが重要と言われる。

また、バランス断面においては、地層が水平に同層厚で堆積する段階とスラスト形成における褶曲の発達段階が全く時期を異にして生じた復元がなされるが、実際の震探断面においては、褶曲は背斜頂部が削剝されていたり、向斜部が埋め立てられていたりすることが多い。すなわち、堆積作用と同時にスラスト構造の形成が生じている場合がある。図3は、断層折れ曲がり褶曲の成長とともに地層が堆積した場合の被覆層の層厚変化を模式的に示している。被覆層の層厚に堆積同時性の褶曲運動の過程が刻み込まれていることから、浅部での記録が非常に重要である。ただし、この場合も深部の断層折れ曲がり褶曲に層厚の変化は考えられていない。

図4は、あるスラスト構造の解釈のプロセスにおいて実施された深度変換断面作成例を示した。スラスト構造では速度の速い地層が上盤側にのし上がり繰り返されるため、時間断面においてはプリアップ現象があるとされる。時間断面をもとに解釈された深度断面図（図4上）では、スラスト下盤の地層面が凹状となるため、引き続き解釈のプロセスにおいてスラストモデルに整合的な層

準同定を図4下のように再解釈している。地震探鉱記録の不鮮明となる深部構造に関しては、幾何学的なスラストのモデルと解釈の繰り返しから、スラストモデルに依存した解釈をする場合が多く、深部形態を限定してしまう。このプロセスからは、スラスト下盤側にはトラップは抽出されない。

以上より、幾何学的なスラスト構造の形態を決定するためには、デタッチメントの深さとランプの角度と長さ、そして移動量に関する正しい理解が必要である。また、幾何学モデルを前提としているとの認識が重要であり、モデル依存の解釈は、時に深部ポテンシャルの評価を見落とす恐れがある。ここで、『幾何学モデルでのスラスト形態』の主な仮定をまとめると、2次元での解釈であるバランス断面作成時には、平面歪で変形をとらえ、変形前後で体積変化が存在しないこと、平行褶曲で構成されることがあげられるが、それは以下を限定した解釈を行っていることになる。

- 層厚一定
- 下面がフラット
- 運動方向を限定
- 変形が隆起方向に進行
- 褶曲時相を特定

図3 堆積同時性の運動により、上盤構造上位に層厚変化を伴う発達をする過程を示した模式図 (after Tearpock *et al.* 1994)

図4 スラスト構造解釈上の問題点（深度変換とスラストモデル）

このような仮定が当てはまらない場合でのスラスト構造を評価する際には、構造形成を考えるうえでの基礎的要素である歪み像、力学像および運動像のうち、力学像と運動像をいかに解釈に盛り込むことができるかを常に考えておくことが重要である。

3. 新潟堆積盆地での現象/解析例

以下には、新潟堆積盆地に認められる深度方向の岩石物性変化と応力状態、ならびに変形構造を左右する岩石物性や運動像に関する地質現象を盛り込んだ構造解析の事例として、新潟地域にて実施した仮想基盤変位法(Kodama, 1990)による解析結果を紹介する。解析対象断面および検討範囲ならびに坑井位置を図5に示す。

仮想基盤変位法とは、地質構造シミュレーションのひとつであり、地層を弾塑性体と見なし有限要素法で解析する。特に、層厚変化をもたらす隆起、沈降、短縮、反転運動などの地質現象を、堆積過程や堆積同時性の構造形成を考えることで段階的に復元し、変形や断裂系の発達を予測することができる。したがって幾何学的解析手法と比較して、力学像や運動像の仮定に対し自由度が高い復元を行える利点を持つ。

3.1 新潟堆積盆地に認められる深度方向の岩石物性変化と応力状態

地下での応力状態を考えた場合、地層内部において岩石によりもたらされる応力は静岩圧と呼ばれ、ある深度での静岩圧は、累積荷重と造構応力の和によって求められ、造構応力の作用しない堆積盆地は標準堆積盆地と呼ばれる(星野, 1970)。

図6には、図9のA-A'断面図上に基礎試錐『新潟平

野』(石油公団, 1991)および基礎試錐『新潟野町』(石油公団, 1995)ほかに認められる地層圧プロファイル(図7)と基礎試錐『新潟』(石油公団, 1968)の ΔTsh 圧密トレンド(図15, 後述)を示した。これらは堆積盆地の沈降域に掘削されており、造構応力の伴わない比較的標準堆積盆地に近い応力状態を示していると考えられる。

図5 使用坑井, 解析対象断面および対象域位置図

図6 A-A'断面での岩石物性情報

図7 新潟平野にて推定される有効応力の垂直変化

一般に堆積盆地内において、垂直応力は深度方向に対して岩石の累積荷重により増大していくが、有効応力（垂直応力から地層圧を差し引いた値）は孔隙内の圧力が増大することによって単純には増大せず、ある深度でその深度が本来持ちうる静岩圧より小さな値で釣り合った不安定な状態になる場合が多い。新潟平野での地層圧プロファイルおよび ΔT_{sh} 圧密トレンドからも、同様な傾向が認められている。つまり、約2,500m以深から5,000mにかけては、地層圧の上昇に伴い有効応力があまり変化しない状態が生じていると考えられ、その存在は、 ΔT_{sh} 圧密トレンドに認められる勾配の変化と対応している。

また、岩石の地下での物性は、それぞれの岩質・岩相、深度により大きく変化することが知られている。これまでの基礎試錐「新潟平野」にて得られた泥質岩での三軸圧縮測定結果（図8）は、深度約3,000m以深から岩石が弾性変形（粘弾性）から弾塑性変形（ダクティルな挙動）に移行し、再び5,000m付近にて脆性な変形になることが示されている。またサンプル5と8の比較では、深部のサンプルが必ずしも高い強度や降伏点を有するとは限らないことがわかる。

以上の現象から、堆積盆地内での応力分布は、封圧の増加に伴う岩石物性の変化（強度や変形挙動の違い）と相まって、深度方向に対して変化し、浅部から深部にか

図8 基礎試錐「新潟平野」での泥質岩サンプルの三軸圧縮測定結果

けて異なった応力分布を示すと考えられる。特に圧密過程での間隙水圧の上昇から有効応力が減少した場合には、必ずしもダクティルな挙動に変化するとは限らない場合も予想される。このような状態のなかで造構応力が生じた場合、有効応力が低下した箇所にスラストが生じやすい環境が形成される。

このような応力分布の違いが、堆積盆地内での褶曲形態や形成機構、浅部と深部との構造差、さらに断裂の発達具合などを規制していると考えられる。堆積盆地での深部から浅部に至る岩石物性変化および有効応力の状態などを勘案すると、スラストなどの断層に伴う変形構造は、深部での延性・流動と関連したデタッチメントの存在から、中深度での褶曲構造、さらに、浅部でのとう曲現象といった変形構造の深部から浅部への移り変わりを反映しており、力学的に釣り合っていると見ることができ

る。以上の標準的な堆積盆地内の物性変化を基礎として、仮想基盤変位法でのシミュレーションを実施した。

3.2 基礎試錐「新潟平野」東西断面 A-A' (83021測線) での解析

解析対象断面 A-A'（図9）は新潟平野の西蒲原郡に位置し、平野部南方に認められる褶曲構造系列トレンドの延長方向に対しほぼ直交する震探断面（83021測線）である。この断面は、時間マイグレート重合断面の深度変換断面図であり、縦/横比は1/1である。反射波時間断面の速度データは、基礎試錐「新潟平野」および「新潟」の坑井速度データに基づきキャリブレーションされ

図9 シミュレーション解析対象断面 A-A'断面 (83021測線)

ている。

この断面上で構造地質的な解析対象は、連続性の良いイベントが示す緩いとう曲現象であり、深部に潜在する火山岩層準が構造形成過程においてどのような変形の履歴を経たかを復元する。

3.2.1 イベントの設定とステージ区分

解析では、基礎試錐「新潟平野」の位置を基準に6イベントを設定し、5つのステージに区分した。

0. 初期段階：椎谷層上限堆積終了時（基礎試錐「新潟平野」3,890m 付近）

初期段階の地質構成としては、図10に示す岩相解釈を行った。なお、強制変位を与える仮想基盤は、椎谷層上限付近のイベントから深部約1,500m 付近に設定した。

1. 椎谷層上限で浅い西山層中のイベント（基礎試錐「新潟平野」3,450m 付近）

ステージ1：西山層 前期 堆積時

堆積物の層準中の連続性の良いイベントのうち、最下層付近のイベントを上限としたステージ。

2. 西山層上限からおおよそ250m 以深のイベント（基礎試錐「新潟平野」2,750m 付近）

ステージ2：西山層 中～後期 堆積時

西山層中において、最も連続性の良いイベントを上限としたステージ。

3. 西山層上限からおおよそ600m 以浅のイベント（基礎試錐「新潟平野」1,950m 付近）

ステージ3：西山層 後期～灰爪層 堆積時

4. 西山層上限からおおよそ1,800m 以浅のイベント（基礎試錐「新潟平野」750m 付近）

ステージ4：灰爪層～魚沼層群 堆積時

図10 初期段階：椎谷層上限堆積終了時のメッシュデータと岩相解釈

震探断面上で認められるとう曲現象を代表する曲率を示しており、かつ連続性が比較的良好なイベントを灰爪層～魚沼層群中から2イベント設定した。

5. 現在の水平面（≒地形）

ステージ5：灰爪層・魚沼層群～現在までの堆積東側が隆起・削剝を受けたものと仮定した。

3.2.2 各ステージの変位量および物性値の決定

- (1) ステージの変位量

各ステージの変位量はおのおのの層厚変化から求めることとし、もともとまっすぐであったイベントが次のステージの堆積物を埋積できるだけのスペースを造り出すように変形したと考える。この場合、構造発達堆積盆の器（底の形態）の変遷であり、そこに堆積物が埋まって行く過程が積みかさなったものと捕らえることができる。仮想基盤変位法では、深部に仮想基盤を設け、あるイベントが次のステージの底の形態に一致するまで仮想基盤に強制変位を与える。仮想基盤とイベントの間の地層は弾塑性変形をするものとし、平面歪み問題として有限要素を解くので仮想基盤の強制変位量（メッシュ下

表1 物性パラメーター

	E			σ_Y			ν	塑性硬化曲線	
	a	b	d	f	g	h		n (指数)	c (勾配)
スタンダード ケース	-0.5	1	0.55	-0.005	0.01	0.55	0.25	0.0	0.0
ブリットル ケース	-0.5	1	0.55	-0.0005	0.001	0.55	0.25	0.0	0.0

限)はステージの示す既知変位量(メッシュ上限)とは当然ながら異なる。強制変位はX, Yのいずれの方向にも拘束されないため、強制変位をどのように与えるかには自由度がある。

(2) 層厚変化

解析断面における層厚変化は、基盤の上下運動に求められるよう、2つのイベントに挟まれたステージの層厚変化を現在の断面図上で下位のイベントから垂線を上位のイベントに延ばすことで測定した。断面から読み取った層厚は、堆積・埋没・統成過程での圧密、さらにはは構造応力を受けている状態での厚さであり、しかもある断面図上での見掛けの層厚である。圧密による地層の層厚変化を考慮していないが、圧密が層厚を減少させる方向にしか働かない限りにおいて、最低限の層厚変化(最低限の堆積盆の底の形態変化=変位量)を解析対象としてしていると解釈できる。

(3) 岩石物性

仮想基盤変位法では、地層を弾塑性体と見なしている。解析に必要な物性値は、ヤング率、降伏強度、ポアソン比、歪み硬化特性のc値およびn値である。ヤング率と降伏強度は埋没深度の関数として与えられ、深度に応じて物性が変化するように考慮されている。これは星野(1977, 1978)の強度と孔隙率、深度と孔隙率の関係を参考に導き出されたものである。

今回の解析では、次の値を堆積物の標準値として用いた。すなわち、自然対数の底をe、地層の埋没深度をZ(km)とすると

$$\text{ヤング率}(E) = -0.5 + 1 \times e^{0.55 \times (-Z)}$$

$$\text{降伏強度}(\sigma_Y) = -0.005 + 0.01 \times e^{0.55 \times (-Z)}$$

$$\text{ポアソン比}(\nu) = 0.25$$

$$c \text{ 値}, n \text{ 値} = 0, 0$$

で示される。

この場合、堆積物は歪みが1%に達した時に降伏(弾性状態から塑性状態に変わる)するように設定しているが、後述するように火山岩類の降伏強度を変えることで物性値に変化を持たせた(表1)。本解析では歪み硬化特性のc値およびn値を0にしていることから、地層を完全塑性体(サン・ブナン物体)と見なしている。

3.2.3 解釈・考察

ステージ2および5での構造発達過程を図11と図12に示す。図11ではステージ2で最適変形を行なったときのメッシュ形態、その時点での剪断裂かおよび破断裂かの分布を表した3種類の出力を示した。

メッシュ図において、メッシュの上限形態は次のステージの層厚分布に相当している。剪断裂かの表示は、図12の凡例のように主応力軸の方向から求めた共役系の断裂を示しており、それぞれが右ずれ、左ずれのセンスを有している。ここでは内部摩擦係数を考慮せず、互いに直交する表示を取っている。図11と図12では右ずれ左ずれの区別は表示されていない。ただし、変形形態および破断裂かの方向をあわせて見ることで、どちらのセンスであるか判断できる。剪断裂かの規模は×の大きさと数で表され、破断裂かはσ1(最大伸張軸・最大主応力軸)と直交する方位をとる。

図12の中央部より東側の相対的隆起は、浅部付近の応力場に変化をもたらしている。すなわち、仮想基盤の曲率が凸状になっている部分のほぼ西側から中央部の浅部では圧縮応力場を形成し、凸部より東側に対しては引張応力場を形成しているのが各裂かの発達分布から読み取れる。仮想基盤に垂直方向の強制変位しか与えていないにもかかわらず、地表付近にて圧縮応力場が形成されている。

さらに、中央部付近の酸性火山岩体部の西翼・東翼部

図11 ステージ2：西山層 中～後期堆積時
(上段：メッシュデータ、中段：剪断裂か分布、下段：破断裂か分布)

図12 ステージ5：灰爪層，魚沼層群～現在までの堆積
(上段：剪断裂か分布，下段：破断裂か分布)

付近が，いずれのステージでも歪みを引き起こす場となっているのがわかる。つまり，緩いという曲現象は基盤断裂が起こりそうな場所を示唆している。

また物性値に関しては，通常堆積物が1.0%で降伏に達するのに対し，想定した酸性火山岩体のみを周辺の地質と比較し非常にブリットな変形挙動を示すよう，ヤング率の値はそのままにして降伏強度の値を10分の1に設定することで降伏歪みが0.1%になるようにしており，その結果，ステージ2および5とも，酸性岩体内部に歪みが集中して分布することが表現されている。歪み表示の増加は岩石が0.1%のわずかな歪みで降伏に達し，変形様式が塑性域に移り変わった結果である。

このように，仮想基盤変位法では各ステージにおいて層厚変化に基づく変形過程を復元することで，歪みの集中する箇所，断裂系の発達する場所，規模，センス，発達の進行方向や移り変わり，形成順序などを推定することができ，火山岩体そのものが後の造構運動の過程で，いつ，どのような歪みを受けたかを解釈することで，フラクチャーなどの分布との相関を探れる可能性がある。構造発達過程からの評価をすれば，深部トラップを探索する際，単に現在の構造曲隆部が鉱床成立に好ましい条件にあるとは言い切れないことも予測できる。

3.3 西山—中央油帯地域 B-B' 断面 (セクション56) の解析

B-B' 断面作成のための検討範囲を図5に示す。図13には解釈対象地域での主要構造系列および坑井位置を示した。

3.3.1 地質概要

解析対象地域の地表には，西から尼瀬—石地背斜，大門背斜，後谷背斜，長嶺背斜（別山潜在構造，西山油帯），小木の城背斜（中央油帯），与板構造が分布する（図13）。さらに東側の平野部の地下には，藤川—雲出ガス田として断層下盤の潜在構造の存在が知られている。

小木の城背斜構造は，複背斜を示す中央油帯（巨視的には箱型背斜の隆起域）に位置し，西に倒れた閉鎖型の分布を示す背斜構造であり，背斜軸をまたいで両翼の地層傾斜が著しい高角度で急変する（鈴木ほか，1974，小林ほか，1986）。また，背斜軸部で掘削された坑井のディップメータによれば，比較的浅部で高角な地層傾斜が深部に向かい低角へと変化し，軸部深部の寺泊層準では地層傾斜の乱れや断層による繰り返しが坑井にて確認されている。さらに深部に位置する吉井—東柏崎のガス田においては，表層の閉じた褶曲とは異なるゆったりとしたグリーンタフ層準での構造形態が存在し，地蔵峠SK-1などの坑井において上部寺泊層泥質岩部以深で Δ Tshトレンドに負の異常が認められるなど，異常高圧部が示唆されている。このことから，小木の城背斜の褶曲の形成には寺泊層準の泥質岩のダイアビル状変形が主として関与していると考えられ，浅部と深部の構造には大きな構造差が存在し，浅部褶曲は根無し構造を呈するとされている。

3.3.2 地表分布ならびに坑井から推定できる地下構造形態

(1) コントロールデータ

B-B' 断面上でコントロールデータとなるのは，地表地質分布に示される鍵層，岩相・層準境界および8坑（西より尼瀬-4，別山-66，小木の城-1，鳥越-2，1，4，雲出SK-21，10，17）の坑井データである。ただし，深部構造の形態推定に関しては，これらに加えて周辺付近の坑井データ（西より出雲崎沖SK-1，南石地-1，田中-5，大門SK-1，薬師峠SK-2，1，蓮華寺SK-1，5，2，3）を地表での褶曲構造の軸長や系列を重視して投影したものを活用した（図14）。

(2) Δ Tsh から見積られる削剥量（＝隆起量）の推定
地表地質分布のみから空中の削剥部分を推定することはかなり困難な作業である。従来から空中部の表現としては，断面図上に投影された地層傾斜を用いて，地表での既知の層厚をバスク図法により同層厚で延長させて描くことが常である。また，一般に削剥部分の推定には各褶曲のプランジ部での走向線の分布や形態，さらに岩相や層厚の変化をみることが有効であり，その際には不整合現象などを把握して解釈しなければならない。

本検討では削剥量の推定に関して坑井の Δ Tsh vs

図13 B-B' 断面周辺地域での構造系列および検討坑井位置図

Depth プロットを坑井間で比較することにより、正確な歪み像の把握に努めた。

標準的な埋没過程を示す ΔTsh トレンドとしては、新潟堆積盆地において地質時代を通じて常に相対的に沈降域にあったと思われる基礎試錐「升潟」の圧密トレンドとした（図15、位置は図5）。この坑井と西山—中央油帯地域の各褶曲系列に対応する坑井とを単純に比較することにより相対的隆起量を見積もり、削剝量を推定した（図15）。その結果として、各系列での削剝量を図14の断面空中部に階段状の太線で示した。

空中部は地表調査や坑井資料から示唆される層厚変化や堆積と同時に進行する構造運動（シンセディメンタリ・テクトニクス）を積極的に盛り込み、椎谷・浜忠層以降の薄頂型成長褶曲として表現した。前述のようにバスク図法により推定される褶曲構造では、 ΔTsh プロットより見積もられる削剝量を上回った堆積ボリュームになってしまう（図14、波線）。

断面東部に推定される落差の大きな断層は、丘陵地と

平野部をほぼ境するところに位置し、地表および坑井データでの急傾斜帯から、ある幅を有する断裂帯として解釈し、深部では大きな実落差を有する成長断層と解釈される。また、断面東部の断層下盤側には、藤川・雲出ガス田として炭化水素の集積の条件を備えた東西翼を持つ深部形態が存在する。

3.3.3 イベント設定とステージ区分

解析対象断面図をもとに次の7イベントを設定し、6ステージに区分した。

0. 初期段階；下部寺泊層上限とグリーンタフ層準上限（ステージ0）

下位のイベントは強制変位を与える仮想変位面であり、この断面上で唯一到達した尼瀬-4のデータから、下部寺泊層上限より約1,825m以深に設定した。

1. 上部寺泊階上限（ステージ1）

このイベントは時間面に相当する。坑井でのコントロールが上部寺泊階の下限まで及ぶのは小木の城-1のみであるため、このイベントより下位層準では層厚変化

図14 シミュレーション解析対象断面 B-B' 断面

図15 ΔTsh -深度プロットの比較による削剝量の推定

の情報はほとんどないが、コンピーテント層を曲がらしめるインコンピーテント層と解釈し、ダイアピル状流動変形の上限として表現している。

2. 砂質岩層準上限 (ステージ2)

泥質岩と砂質岩の岩相境界に相当し、小木の城背斜西翼部では西山層の浜忠層上限に、東翼部では椎谷層上限に対応している。椎谷階の時間面としてのイベントを設定せずにこのような岩相境界を設定したのは、同砂岩相がコンピーテント層と考えられ、テクトニックイベント(変形度の指標)として捕らえられるからである。

3. 西山階上限 (ステージ3)

地表での SK030 (Zr), SK100 (Iz) の鍵層間に存在し、広域かつ坑井での対比が可能な時間面。

4. 魚沼/灰爪層境界 (ステージ4)

不整合面であり、時間面としても扱いうる。また、形成時には比較的平坦(水平面に近い?)であることが予想される不整合面を曲がらしめていると解釈すれば、造構変位量を推定するうえでの良きテクトニックイベントとして扱え、変形度の指標となる。

5. 魚沼層準堆積終了時 (ステージ5)

魚沼層準の堆積量を推定。褶曲の形成と同時に進行し、相対的沈降部を埋め立てているように解釈した。

6. 空中部上限 (ステージ6)

ΔTsh トレンドより推定した隆起量を考慮したイベントであり、成長褶曲に伴う地層の盛り上がり表現している。変形度の指標として扱う。

シミュレーションのコントロールデータとしての各ステージでの層厚変化は、垂直方向の厚さ変化のみを考慮して設定した。なお、岩石物性はA-A'断面での堆積物と同様な設定とした。

3.3.4 解析結果と考察

(1) 深部構造と浅部褶曲構造の形成

図16上段のステージ4ではこれまでの変形が積算されて、仮想変位層準で5箇所の背斜構造が形成されている。これらの深部構造は、西方より後谷背斜北方延長の潜在構造、長嶺—別山潜在構造、小木の城背斜潜在構造、与板潜在構造、藤川—雲出潜在構造として、現在の背斜構造にほぼ対応すると考えられる。ステージ4での

図16 B-B'断面 シミュレーション結果
(上段：ステージ4での剪断裂か分布、
中段：垂直変位のみを与えつけたステージ6での剪断裂か分布、
下段：垂直・水平変位の両方を与えたステージ6での剪断裂か分布)

復元段階においては、浅部と深部の構造差は大きく、地表の向斜部の深部に背斜が存在していたことが解析される。

図16中段は垂直方向のみの変位を与え続けた最終段階の解析結果であり、元となるB-B'断面と比較すると、単純なコントロールデータに基づき仮想変位面に垂直方向の変位のみを与えただけであるにもかかわらず、解析対象とした元の断面図の地表付近をかなり再現していると言える。つまり、解析対象断面図を作成する際に水平圧縮に起因すると解釈した地質構造の大枠が、シミュレーションのうえでは各層準の層厚の変化に基づき垂直方向の変位が積算されていくだけで復元されるということの意味する。

しかしながら、この段階では小木の城背斜の西翼での逆転傾斜や与板構造の東翼での急傾斜に整合するような形態を十分には再現できていない。図16下段では、より地表の地層傾斜に合わせるため、急傾斜が生じている箇所の深部付近に東方向からの短縮を与えた。小木の城背斜や与板構造の形態、さらに断層下盤側のイベントの位置関係が、元の解析対象断面にいっそう近づいている。

解析対象図面に基に幾何学的な長さを測定すれば、砂質岩層準上限の元の長さは、現在の水平距離（西から約9.5km間）に対し約12.5kmであり、その短縮比は約76%にも達する。ところが、シミュレーションの結果からは、解析断面の全長（13.25km）をわずか約1km縮めるだけで過褶曲のほとんどを再現できることになる。

今回の解析のように、主に仮想変位面に垂直方向の成分を与え続けて変形を受けた地層は、褶曲構造の翼部で埋没段階から垂直成分の長さを持ち、さらに変形過程で引き伸ばされていることになるため、結果として褶曲翼部には垂直方向の引張応力場が卓越して形成され、断裂系もそれに合うものが発達するはずである。このことは、水平短縮で生じた褶曲とは異なる応力場や断裂系が、構造翼部において発達することを意味する。最終形態を再現する変形過程、特に運動方向の予測は一義的に定まらない。しかしながら、以上のような“歪み像”に至るまでの“運動像”や“力学像”の情報を盛り込んだ検討を行うことで、問題点や次なる解析の糸口や発想を見つけることが可能となる。

(2) 小木の城背斜・与板構造の深部構造

シミュレーションの結果は、小木の城背斜・与板構造に関して地表傾斜にほぼ整合させることができた。しかし、再現された深部構造は非常に閉じた注入状の背斜構造である。設定した仮想変位面は、推定したグリーンタフ層準上限にあったが、半基盤岩的なグリーンタフ層準がシミュレーション結果に見られるような注入状の形態

まで変形することは考え難い。

前述したごとく、小木の城背斜の深部形態に関しては薬師峠や地藏峠の各坑井、さらには同背斜の南方延長部に位置する吉井一東柏崎ガス田にて深部に比較的安定したグリーンタフ層準の構造形態をつかんでいることから、このような変位は泥質岩によるダイアピリズムによる運動を表していると解釈したほうが既存の地質データに整合する。

4. おわりに

地質構造の理解は「歪み像」、すなわち断面図の形態から認識されていくわけであるが、その表現方法は従来からコンパスによる層厚一定の幾何学的図法が主流で描かれてきた。しかしながら、自然現象として地表から地下深部への物性の違いが存在しているのに対し、幾何学的図法に基づく発達史の復元のなかには、物性のデータを定量的に盛り込むことは不可能である。

本稿では、堆積盆地内での物性変化や力学的な定量解析を行える弾塑性有限要素法による構造シミュレーションを実施した場合の解析例を中心に述べた。シミュレーションを含む解釈の過程においては、解析の目的を明確にすることが重要であることは言うまでもないが、それらをサポートするデータの収集と地質現象の理解、コントロールデータの質・量をともにレベルアップすることが高精度の解析につながる。また、「仮想基盤変位法」の有効性のひとつとしては、変形に関する認識や力学的バランスに対する学習効果があげられる。この解析手法を実施することで、震探を解釈するときの留意点や断面図作成時の褶曲・断層の表現力が養われると考えられる。

スラスト構造に代表される複雑な地質構造を解釈し、特に深部において新規トラップを発見していくには、地質構造を決定づける基本要素、歪み像・力学像・運動像のおのおのを積極的に盛り込んだ検討と、データに対する認識が重要である。

謝 辞

通産省資源エネルギー庁および石油公団には基礎試錐の資料の公表を、帝国石油株式会社ならびに石油資源開発株式会社には坑井データの公表を許可していただきました。この内容を検討するにあたっては、地質調査所の小玉喜三郎博士ならびに関係諸氏、帝国石油株式会社の

関係諸氏に多大な援助と貴重なご意見やご助言を頂いております。ここに深くお礼を申し上げます。また、シンポジウムでの講演と投稿の機会を与えていただいたシンポジウム世話人の皆様に心から感謝いたします。

引 用 文 献

- 星野一男, 1970: 石油地質学と岩石物性学—堆積盆地の静岩圧分布について—, 石技誌, 35 (4), 179-186.
- 星野一男, 1977: 物性変化からみた圧密の進行について, 石技誌, 42 (2), 22-31.
- 星野一男, 1978: 圧密の進行と機構について, 地質学論集15, 15-34.
- 今村哲己, 1998: スラスト構造のポテンシャル評価, 石油の開発と備蓄, 98 (8), 44-61.
- 小林巖雄・立石雅昭・安井 賢・風岡 修・黒川勝己・油井 裕・渡辺其久郎, 1986: 新潟堆積盆地における西山・灰爪累層, 魚沼層群の層序と古環境, 地質学雑誌, 92 (5), 375-390.
- Kodama, K., Long, X.-M. and Suzuki, Y., 1985: Structural analysis of deep-seated volcanic rock reservoirs by tectonic simulation. U. N. ESCAP CCOP Tech. Bull., 17, 61-79.
- Kodama, K., 1990: Fracture simulation in petroleum basin by virtual basement displacement method. 8th WGRA, Workshop Sept. 3, 1990, Chiangmai.
- 鈴木尉元・三梨 昂・宮下美智夫・影山邦夫・島田忠夫, 1974: 新潟県西山・中央油帯の地質, 地質調査所報告 新潟第三系堆積盆地の形成と発展 層序編, 250-1, 67-95.
- 石油公団, 1968: 昭和43年度 国内石油・天然ガス基礎調査, 基礎試錐『升潟』調査報告書, 21p.
- 石油公団, 1991: 平成元年度 国内石油・天然ガス基礎調査, 基礎試錐『新潟平野』調査報告書, 132p.
- 石油公団, 1995: 平成4年度 国内石油・天然ガス基礎調査, 基礎試錐『新竹野町』調査報告書, 129p.
- Tearpock, D. J. and Bischke, R. E., 1991: *Applied subsurface geological mapping*. Prentice Hall Ptr, Upper Saddle River, New Jersey 07458. 648p.
- Tearpock, D. J., Bischke, R. E. and Brewton, J. L., 1994: Quick look techniques for prospect evaluation. Subsurface Consultants & Associates, Inc., Lafayette, Louisiana 70508. 286p.
- Woodward, N. B., Boyer, S. E. and Suppe, J., 1989: Balanced geological cross-sections: An essential technique in geological research and exploration. *Short Course in Geology: Vol. 6*, 28th Inter. Geol. Cong., Washington, D. C. 132p.